



## 비정상 전 마하수 유동해석을 위한 이상유동 RoeM/AUSMPW+ 수치기법 확장

Extension of Two-phase RoeM and AUSMPW+ Scheme for Unsteady Low Mach Number Flows

---

저자 (Authors)	김형준, 김현지, 김종암 Hyeongjun kim, Hyunji Kim, Chongam Kim
출처 (Source)	<a href="#">한국항공우주학회 학술발표회 논문집</a> , 2016.4, 578-580 (3 pages)
발행처 (Publisher)	<a href="#">한국항공우주학회</a> The Korean Society For Aeronautical And Space Sciences
URL	<a href="http://www.dbpia.co.kr/Article/NODE07068082">http://www.dbpia.co.kr/Article/NODE07068082</a>
APA Style	김형준, 김현지, 김종암 (2016). 비정상 전 마하수 유동해석을 위한 이상유동 RoeM/AUSMPW+ 수치기법 확장. 한국항공우주학회 학술발표회 논문집, 578-580.
이용정보 (Accessed)	서울대학교 147.46.118.*** 2017/04/28 12:07 (KST)

---

### 저작권 안내

DBpia에서 제공되는 모든 저작물의 저작권은 원저작자에게 있으며, 누리미디어는 각 저작물의 내용을 보증하거나 책임을 지지 않습니다. 그리고 DBpia에서 제공되는 저작물은 DBpia와 구독계약을 체결한 기관소속 이용자 혹은 해당 저작물의 개별 구매자가 비영리적으로만 이용할 수 있습니다. 그러므로 이에 위반하여 DBpia에서 제공되는 저작물을 복제, 전송 등의 방법으로 무단 이용하는 경우 관련 법령에 따라 민, 형사상의 책임을 질 수 있습니다.

### Copyright Information

Copyright of all literary works provided by DBpia belongs to the copyright holder(s) and Nurimedia does not guarantee contents of the literary work or assume responsibility for the same. In addition, the literary works provided by DBpia may only be used by the users affiliated to the institutions which executed a subscription agreement with DBpia or the individual purchasers of the literary work(s) for non-commercial purposes. Therefore, any person who illegally uses the literary works provided by DBpia by means of reproduction or transmission shall assume civil and criminal responsibility according to applicable laws and regulations.

# 비정상 전 마하수 유동해석을 위한 이상유동 RoeM/AUSMPW+ 수치기법 확장

김형준<sup>1\*</sup>, 김현지<sup>1</sup>, 김종암<sup>12</sup>

서울대학교 항공우주공학부<sup>1</sup>, 서울대학교 항공우주신기술연구소<sup>2</sup>

## Extension of Two-phase RoeM and AUSMPW+ Scheme for Unsteady Low Mach Number Flows

Hyeongjun kim<sup>1\*</sup>, Hyunji Kim<sup>2</sup>, Chongam Kim<sup>12</sup>

### 초 록

본 연구에서는 비정상 시스템 예조건화 기법과 이상유동 RoeM, AUSMPW+ 수치기법의 수치점성 조절을 통하여 보다 정확하고 효율적인 수치해석자를 구현하였다. 정상유동에서 성공적으로 사용되는 시스템 예조건화 기법은 비정상 유동에 적용 시, 그 효율성이 매우 저하되고, 시스템 예조건화 matrix와 연관된 수치점성항은 정확도를 파괴하는것으로 알려져 있다. 따라서 시스템 예조건화 기법에는 Strouhal number를 이용하여 수렴성을 향상시키는 연구를 적용하고, 수치점성항은 AUSM+ -up수치기법의 scaling function을 도입하되, 비정상 유동의 정확성 향상을 위해 새롭게 변형하여 적용하였다. 이러한 수치기법을 사용하여 다양한 검증문제를 해석하고, 이를 바탕으로 췌기 후류의 비정상 공동문제를 해석하고 실험결과와 비교하였다.

### ABSTRACT

This paper deals with the unsteady preconditioning method that is used to alleviate numerical stiffness due to disparity of system eigenvalues. The preconditioning method that is used in steady flows has not performed well in unsteady flows since the preconditioning parameters that are optimal for convergence are detrimental to the level of spatial dissipation necessary for accuracy. Thus, we improve the steady preconditioning method of two-phase RoeM and AUSMPW+ scheme for unsteady low Mach number flow by proper scaling of velocity and pressure dissipation terms. Employing the scaling function that is used in AUSM+up scheme, the pressure dissipation of both scheme is scaled using unsteady scaling while the velocity dissipation is remained in steady scaling. As a validation, we present several test cases for unsteady, convection-dominated, and acoustic-dominated flows which demonstrate significant improvement in terms of accuracy and convergence rate over the previous two-phase RoeM and AUSMPW+ schemes. Finally, we compute an unsteady cavitation behind a 2-D wedge and compare the computed results with experiment.

**Key Words :** All-speed flow(전마하수 유동), Two-phase flows(이상유동), Roe Scheme, AUSMPW+ scheme, Unsteady preconditioning(비정상 예조건화)

### 1. 서 론

저속 정상유동에서 지배방정식의 stiffness 를 성공적으로 해결한 예조건화기법은, 비정상 유동을 해석하는데 있어서는 그 효과를 제대로 발휘하지 못하는것으로 알려져 있다. 또 한편으로 시스템예조건화 기법은 수치점성에도 영향을 주게 되는데, 정상유동에서 적절하게 scaling 된 수치

점성은 비정상 유동에 적용 할 때 과도하게 diffusive 한 특징을 보인다. 따라서 본 연구에서는 이러한 문제들을 인식하여 기존의 이상유동 RoeM 과 AUSMPW+ 기법<sup>(1,2)</sup>에 비정상 예조건화 기법을 적용하는 한편 수치점성을 적절히 조절하여 저마하수 영역에서의 수렴성과 정확성을 향상시키고자 한다.

## 2. 지배방정식 및 수치기법

### 2.1 지배방정식

이상유동을 표현하기 위해서 균질 혼합류 모델(homogeneous mixture model)을 사용하였다. 기체상과 액체상이 혼합된 상태를 새로운 pseudo-fluid 로 보고, 그 압력, 속도, 온도는 기체상과 액체상의 물성을 적절히 평균하여 결정한다.

$$\frac{1}{J} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\Gamma}{J} \frac{\partial Q_p}{\partial \tau} + \frac{\partial E}{\partial \xi} + \frac{\partial F}{\partial \eta} = \frac{\partial E_v}{\partial \xi} + \frac{\partial F_v}{\partial \eta} + S_{\text{phase}} \quad (1)$$

$J, \Gamma, S_{\text{phase}}$ 는 각각 Jacobian 행렬, 예조건화 행렬, 상태변화에 대한 소스항이다.  $Q$ 와  $Q_p$ 는 보존 변수와 원시변수 벡터를 나타내며,  $E$ 와  $E_v$ 는  $\xi$ 방향 비점성, 점성 flux 벡터이다.

$$Q = [\rho \quad \rho u \quad \rho v \quad \rho E \quad \rho Y_1]^T \quad (2)$$

$$Q_p = [p \quad u \quad v \quad T \quad Y_1]^T \quad (3)$$

여기에서 모든 물성은 혼합류의 물성을 의미하고  $Y_1$ 은 기체상의 질량비이다.

수치기법은 이상유동 RoeM 및 AUSMPW+ 기법을 사용하였다.

### 2.2 비정상 시스템 예조건화

시스템 예조건화 행렬은 Weiss and Smit 의 방식을 따라 보존변수를 원시변수로 변환하는 행렬의  $\frac{\partial p}{\partial \beta}$ 항을 1로 치환한 행렬을 사용하였다. 예조건화 파라미터  $\beta$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$\frac{1}{\beta} = \frac{1}{c^2} - \frac{\rho_T(1-\rho_{hp})}{\rho h_T} \quad (4)$$

Strouhal number 가 높은 비정상 유동의 경우 물리적 음속을 정확하게 다루는 것이 중요하다. 음속을 유동 속도에 맞추어 변화시킨  $c'_{\text{steady}}$ 을 비정상 유동에 사용하면, 낮은 마하수에서 압력장에 점성이 지나치게 되어 원치 않는 해석 결과를 얻는다. 따라서 적절한 비정상 시스템 예조건화는 Strouhal number 가 높을 때 시스템을 원래의 형태로 돌려주어야 한다. Hosangadi *et al.*<sup>(3)</sup>과 같이 Strouhal number 를 포함한 비정상 시스템 예조건화 음속을 아래와 같이 정의하였다.

$$c'_{\text{unsteady}} = \min(c, \max(V, \frac{L_{\text{chr}}}{\pi \Delta t}, V_{\text{ref}})) \quad (5)$$

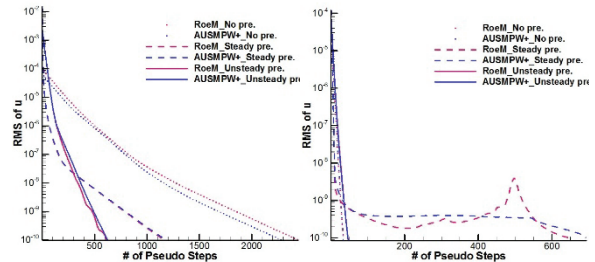
$L_{\text{chr}}$ 는 특성길이이고,  $\Delta t$ 는 physical time step 이다.

## 3. 수치해석 결과

### 3.1 비정상 vortex 전파 문제

vortex 가 자유류 마하수 0.005 인 비점성 유동에서 전파되는 문제이다. 마하수가 매우 낮은 유동이므로 비정상 시스템 예조건화를 적용하여

정상 예조건화와 예조건화를 적용하지 않은 경우를 비교하였다. Figure 1 에서 보듯이 Strouhal number 가 클 경우 비정상 예조건화와 예조건화를 하지 않은 경우는 정상 예조건화에 비해 확연히 향상된 수렴속도를 보여준다.



(a) Str ≈ 25.46 (b) Str ≈ 5092.96

Figure 1. Comparisons of convergence history

## 4. 결 론

기존의 이상유동 RoeM 과 AUSMPW+ 기법을 일반적인 상태방정식과 함께 사용할 수 있도록 확장하였다. 비정상 시스템 예조건화를 적용하여 비정상 저마하수 유동 해석 시 수렴성을 크게 향상시켰고, 저마하수 유동에서 보이는 수치 불안정성과 정확성 저하 문제를 수치점성 조절을 통해 극복하였다. 정상, 비정상 저마하수 유동 문제로 수치점성 조절과 비정상 시스템 예조건화가 성공적임을 확인하였고, 향후 공동현상과 같은 다양한 이상유동의 비정상 특성을 분석하는데 본 연구 결과가 효과적으로 응용될 수 있을 것으로 보인다.

## 후 기

본 연구는 2015 년도 미래창조과학부의 재원으로 한국연구재단 첨단 사이언스·교육 허브 개발사업(NRF-2011-0020559) 및 우주핵심기술 개발사업의 일환인 우주교육시스템구축사업(NRF-2015M1A3A3A05027630)의 지원을 받아 작성되었습니다.

## 참고문헌

- 1) S-W. Ihm and C. Kim, 2008, "Computations of homogeneous-equilibrium two-phase flows with accurate and efficient shock-stable schemes," AIAA Journal, Vol. 46, No. 12, pp. 3012~3037.
- 2) H. Kim, D. Min, and C. Kim, 2014, "Computations of cryogenic cavitating flow around turbopump inducer," Proceedings of ICCFD8, Chengdu, China.



- 3) A. Hosangadi, J. Sachdev, and V. Sankaran, 2012, "Improved flux formulations for unsteady low Mach number flows," Proceedings of ICCFD7, Big Island, Hi.